



TITLE:

層間高靱化CFRPの静的・疲労き裂進展およびその高靱化に関する破壊力学的研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

佐藤, 成道

CITATION:

佐藤, 成道. 層間高靱化CFRPの静的・疲労き裂進展およびその高靱化に関する破壊力学的研究. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-01-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19412>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（工学）	氏名	佐 藤 成 道
論文題目	層間高靱化 CFRP の静的・疲労き裂進展およびその高靱化に関する破壊力学的研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>炭素繊維強化プラスチック（CFRP）積層板、中でも層間に高靱化材料を局所的に配置しはく離進展抵抗値を飛躍的に高めた層間高靱化 CFRP は、比強度、比剛性に優れ、航空機構造の標準材料となりつつある。更なる航空機の燃費および性能向上のためには、リベット使用量の削減による軽量化および低コスト化が重要課題である。そのためには、最弱破壊モードであるはく離進展メカニズム解析の深化、はく離抑制に必要な破壊力学特性の評価手法の構築、CFRP の更なる高靱化、などの課題に取り組む必要がある。本論文はこれらの課題について取り組んだものであり、7 章からなる。</p> <p>第 1 章は緒論であり、研究背景および本論文の目的を述べている。まず、靱性と圧縮強度を同時に高めることができる層間高靱化 CFRP の開発経緯と、CFRP 構造の設計基準における破壊力学特性の重要性について述べている。次にこれまでののはく離破壊に関する破壊靱性評価および疲労き裂伝ば特性評価、およびその層間高靱化材料への適用に関する研究動向について示した上で、本研究の目的を述べている。</p> <p>第 2 章では、炭素繊維の表面処理のみ異なる層間非高靱化 CFRP、あるいは層間に PA12 粒子を配置した層間高靱化 CFRP のモード I 層間はく離破壊靱性試験を実施した。その結果、層間高靱化 CFRP では、繊維－樹脂間の接着強度によって破壊靱性値のき裂長さ依存性（R カープ）の傾向が大きく異なるが、それはき裂の進展経路が層間の高靱化樹脂層であるか、層内の繊維過多層であるかに強く依存していることを示した。また、層間高靱化 CFRP ではき裂の進展経路によって破壊靱性値の最小値やそのときのき裂長さも異なることが明らかとなった。層間高靱化 CFRP における破壊靱性値の最小値を把握するには、繊維層内から発生するはく離の評価が必要となると示唆された。</p> <p>第 3 章では、CFRP 積層板の繊維層内から発生するき裂の進展特性を評価するために、プリプレグの製造工程にて離型性の高いフィルムを直接繊維層の内部に配置し、これを初期欠陥とするき裂進展評価法（層内フィルム挿入法）を提案した。さらに層間非高靱化 CFRP に本手法を適用し、層間と層内の両方のき裂伝ば特性を比較した結果、伝ば時の破壊靱性値に関して層内のほうが層間に比べ高くなった。層内のほうが、層間に比べて架橋した繊維束が太く、かつその総数も多かったことなどが破壊靱性値の向上に寄与していると考えられた。一方、破壊靱性値の初期値は両方で差がなく、いずれも層間非高靱化 CFRP の破壊靱性値の最小値を示すと考え</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤 成道
<p>られた。次に、この手法を層間高靱化 CFRP に適用し、層間高靱化 CFRP の繊維層のき裂伝ば特性を評価した結果、層間高靱化 CFRP の繊維層の破壊靱性値の初期値が、層間高靱化 CFRP の破壊靱性の最小値であった。すなわち、き裂進展抑制のためには、この繊維層の破壊靱性値の初期値に配慮した構造設計が重要と考えられた。</p> <p>第4章では、前章にて提案した層内フィルム挿入法を用いて、層間高靱化 CFRP のモード I 層内疲労き裂進展特性の定量化を初めて検討するとともに、結果を層間の特性と比較した。その結果、層間高靱化 CFRP のき裂進展速度 da/dN は、負荷されるエネルギー解放率の最大値 G_{max} が同じである場合、き裂進展経路が層間の場合よりも層内の場合のほうがはるかに大きくなった。さらに、層内き裂の進展開始時の da/dN-G_{max} 関係が層内き裂進展および層間き裂進展の両方を考慮した場合の最も安全側の指標となることが明らかになった。</p> <p>第5章では、層内き裂進展特性の支配因子である繊維架橋の効果を明らかにすべく、一方向 CF/エポキシ積層板を対象とした層間と層内の疲労き裂進展試験を行った。また、その結果を静的破壊靱性試験の結果と比較することで、繊維架橋によるき裂進展抵抗のき裂長さ依存性を検討した。き裂が層間を進展する場合より繊維層内を進展する場合に繊維架橋が多く発生し、繊維架橋によるき裂先端の応力遮へい効果が強くなることを定量的に示した。さらに層間／層内き裂進展試験のいずれにおいても、応力遮へい効果における繊維架橋の寄与度 (K_{bridge}/K_{app}) は、静的負荷と疲労負荷間で差がないことを示した。</p> <p>第6章では、層間高靱化 CFRP、特に層間粒子強化 CFRP の高靱化層のさらなる高靱化を目的として、カーボンナノチューブ、グラフェンをはじめとするカーボンナノフィラーとマイクロサイズの PA6 粒子を併用した際のエポキシ樹脂の高靱化の効果を検討した。その結果、酸化グラフェンの高靱化効果が特に強く、PA6 粒子と酸化グラフェンを併用することで破壊靱性値 K_{IC} を約2倍に向上させることに成功した。さらに SEM による破面観察により、酸化グラフェンの層破壊を起点とするマイクロクラックによるき裂面の分岐、および鈍化が破壊靱性向上に大きく寄与したと考えられた。</p> <p>第7章は結論であり、本研究で得られた成果ならびに今後の課題を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、航空機構造の標準材料となりつつある層間高靱化炭素繊維強化プラスチック (CFRP) において、その最弱破壊モードであるはく離進展メカニズム解析の深化、はく離抑制に必要な破壊靱性値および疲労き裂伝ば特性の評価手法の構築、層間高靱化層の更なる高靱化などの課題について取り組んだものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1) 繊維－樹脂間の接着強度の異なる 3 種類の層間高靱化 CFRP のモード I 層間はく離き裂進展試験を実施し、繊維－樹脂間の接着強度はき裂の進展経路に強く影響を与え、また靱性値とき裂長さの関係もそれに伴い変化することを示した。また従来の層間フィルム挿入法を用いた破壊靱性評価では層間高靱化 CFRP の破壊靱性値の最小値を評価できず、危険側の評価となる可能性を指摘した。

2) 繊維層の中央に初期欠陥を配置する層内フィルム挿入法を提案し、従来測定困難とされてきた CFRP の繊維層の破壊靱性評価法を確立した。本手法を層間高靱化 CFRP に適用することで、同 CFRP の繊維層内の破壊靱性値を初めて評価した。その結果、層間高靱化 CFRP の破壊靱性値の最小値である繊維層の破壊靱性の初期値を取得することに成功した。

3) 層内フィルム挿入法により繊維層内に初期欠陥を導入した層間高靱化 CFRP の疲労き裂進展特性を初めて評価した。さらに、き裂先端のエネルギー解放率の最大値 G_{\max} を一定に制御し、き裂進展速度 da/dN のき裂長さ依存性を複数取得することで、最も安全側の da/dN - G_{\max} 関係が得られることを示した。また、繊維架橋によるき裂長さ依存性のメカニズムを明らかにした。

4) 層間高靱化 CFRP の層間高靱化層の靱性を向上させる新たな試みとして、グラフェンナノフィラーとポリアミド粒子を併用したエポキシ樹脂の高靱化技術を提案し、粒子界面はく離によるき裂分岐により靱性値が 2 倍近くまで向上することを示した。

以上のように本論文は、層間高靱化 CFRP のはく離き裂進展メカニズムの検討を深化させるとともに、はく離抑制設計技術の確立に大いに貢献した。得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 12 月 1 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。